

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ
МЛЭ-ПЛЕНОК GaAs *n*-ТИПА
В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ 1,50–4,75 эВ****С. Н. Свиташева***Институт физики полупроводников им А. В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск
E-mail: Svitashева@thermo.isp.nsc.ru*

Показана возможность определения толщины и спектральной зависимости комплексного показателя преломления верхних слоев сложных тонкопленочных структур на основе арсенида галлия, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии с помощью спектральной эллипсометрии – неразрушающего бесконтактного оптического метода – при использовании осцилляторной модели диэлектрической функции.

Введение. Высокочастотные (гигагерцового диапазона) транзисторы и интегральные схемы на основе полупроводников типа A_3B_5 благодаря малому весу и объему и высокой экономичности широко используются в устройствах индивидуальной мобильной и спутниковой связи, а также в бортовых радиолокационных станциях. В настоящее время наилучшие параметры имеют СВЧ-транзисторы, изготовленные на основе многослойных гетероструктур, синтезированных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ).

В [1] разработана технология получения гетероэпитаксиальных структур n^+ -GaAs/ n -GaAs/GaAs для мощных СВЧ-транзисторов типа MESFET с удельной выходной мощностью 0,8 Вт/мм и n^+ -GaAs/AlGaAs/ n -GaAs/GaAs для мощных СВЧ-транзисторов типа HFET с удельной выходной мощностью 0,9 Вт/мм на частоте 17,7 ГГц.

Ширина затвора таких транзисторов обычно 0,13–0,50 мкм, тогда как его длина достигает долей миллиметра. Толщина активного слоя составляет 0,15–0,30 мкм, а уровень его легирования лежит в пределах $(1-5) \cdot 10^{17}$ см⁻³.

Требования к эпитаксиальному слою могут быть сформулированы довольно просто на основании функциональных свойств прибора (но удовлетворить им удается с большим трудом) [2]:

а) буферный слой должен содержать минимально возможное количество мелких и глубоких центров, обеспечивая при этом пространственно-резкий потенциальный барьер необходимой высоты для электронов в канале;

б) однородность толщины и уровень легирования активного слоя должны быть предельно высокими.

При отработке режимов выращивания отдельных слоев для контроля их параметров обычно используются следующие методики: низкотемпературная фотолюминесценция, холловские и $C-V$ -измерения. Однако для контроля рабочих структур требуются неразрушающие бесконтактные методики. В данной работе рассматривается использование метода спектральной эллипсометрии в области 1,50–4,75 эВ для измерения толщин и оптических констант слоев, образующих структуры (табл. 1).

Обоснование работы. Энергия края собственного поглощения GaAs при комнатной температуре равна 1,425 эВ. Поскольку этот полупроводник прямозонный, то вблизи собственного края поглощения происходит резкий рост поглощения и при энергии фотонов $\hbar\nu \approx 1,6$ эВ значение коэффициента затухания $\alpha = 4\pi k/\lambda \approx 10^4 \text{ см}^{-1}$, что соответствует коэффициенту поглощения $k \approx 0,1$. В [3] показано, что уровень легирования в пределах $5,9 \cdot 10^{17} - 3,0 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ изменяет коэффициент затухания α GaAs n -типа для энергий фотонов 1,3–1,6 эВ, однако даже в таком узком диапазоне приращение α может менять знак (рис. 1).

Известно также, что наибольшие изменения оптических свойств наблюдаются в области критических точек, т. е. при энергиях переходов из валентной зоны в зону проводимости. В области спектра 1–7 эВ таких переходов несколько, что следует из табл. 2, где приведены параметры зонной структуры арсенида галлия [4].

Однако современное представление диэлектрической функции ϵ арсенида галлия суммой осцилляторов в диапазоне 1,5–5,5 эВ приводит к следующим значениям энергий переходов [5] (табл. 3):

$$\epsilon = \epsilon_1 + i\epsilon_2 = (n^2 - k^2) + i2nk, \quad (1)$$

$$\epsilon(E) = 1 + \sum_{i=1}^7 A_i \left(\frac{1}{E + E_i + i\Gamma_i} - \frac{1}{E - E_i + i\Gamma_i} \right),$$

где E – энергия осциллятора, Γ – фактор затухания.

В табл. 2 и 3 (взятых из работ [4, 5]) отмечены осцилляторы (1), энергии которых не попадают в диапазон наших измерений. Следовательно, наибо-

Т а б л и ц а 1

Слой	Толщина, мкм
GaAs:Si n -типа $n_{Si} = (3,0-3,5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$	0,3
i -GaAs	0,3
CP (AlAs 5 ML + GaAs 7 ML) · 20 периодов	0,068
i -GaAs	0,3
АГЧП-10	

П р и м е ч а н и е. CP – сверхрешетка, толщины слоев которой заданы в монослоях (ML). Подложка АГЧП-10 – полуизолирующий GaAs. Все исследуемые структуры выращены на одной установке.

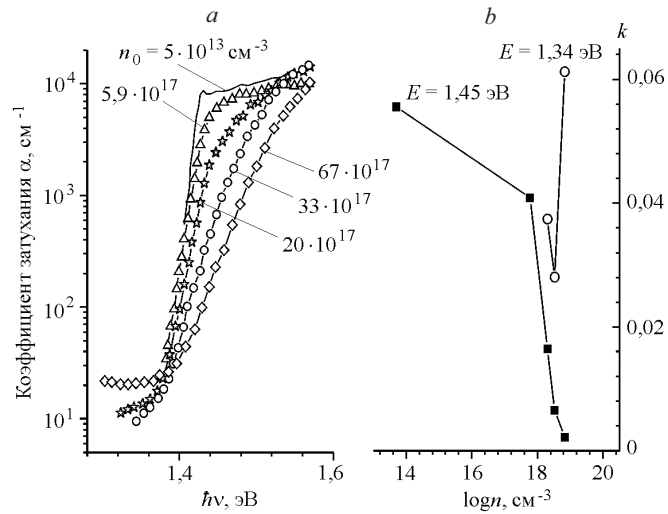


Рис. 1. Концентрационная зависимость: *a* – коэффициента α для GaAs *n*-типа в диапазоне 1,3–1,6 эВ (получена из спектров отражения с использованием дисперсионного соотношения Крамерса – Кронига [3]); *b* – коэффициента k для $E = 1,45$ эВ и $E = 1,34$ эВ

лее интересным для исследований является диапазон энергий 3,0–3,5 эВ и в окрестности точки 4,5 эВ.

В области слабого поглощения от 1,5 до 2,6 эВ в измеряемом спектре следует ожидать интерференционного эффекта, притом что толщина GaAs, на которой интенсивность отраженного света согласно закону Бугера – Ламберта затухает в 10 раз, изменяется от $\sim 2,57$ до $\sim 0,16$ мкм.

Цель данной работы – определить для пленок GaAs *n*-типа, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, спектральную зависимость не только показателя преломления, но и коэффициента поглощения, т. е. как действительную, так и мнимую часть комплексного показателя преломления $N = n + ik = \varepsilon^{1/2}$, а следовательно, и комплексную диэлектрическую функцию (1). Кроме того, вычислить толщины двух верхних слоев исследованных структур и показать воспроизводимость технологического процесса.

Т а б л и ц а 2

GaAs	E , эВ
E_g	1,43
E_{L1}	2,99
E_{L2}	3,23
$E_{\Gamma 2}$	4,52
E_{X1}	5,12
E_{X2}	5,55
E_{L3}	6,60
E_{L4}	6,90

Т а б л и ц а 3

№ п/п	E_i , эВ
1	2,9207
2	3,1267
3	3,5036
4	4,0500
5	4,4790
6	4,8210
7	6,5595

Эксперимент. Структуры выращивались методом МЛЭ на установке Riber-32P. В качестве подложек использовались пластины полуизолирующего арсенида галлия диаметром 40 мм. Контроль скорости роста осуществлялся с точностью $\pm 1\%$ методом дифракции быстрых электронов на отражение по периоду осцилляций интенсивности зеркального рефлекса.

Оптические измерения выполнены на спектральном эллипсометре фирмы "Jobin Yvon" в диапазоне энергий 1,50–4,75 эВ.

Измеренные спектры эллипсометрических углов $\Psi(E)$ и $\Delta(E)$, которые связаны с относительным коэффициентом отражения $\rho(E)$ равенством

$$\operatorname{tg} \Psi e^{i\Delta} = R_p / R_s \equiv \rho, \quad (2)$$

были откорректированы с учетом образовавшегося окисла при использовании соотношения Друде, Арчера и Саксены [6]. Здесь R_p и R_s – коэффициенты Френеля для p - и s -поляризованного света; Ψ , Δ и $\bar{\Psi}$, $\bar{\Delta}$ – эллипсометрические углы для структур с тонким ($d \ll \lambda$) окислом и без него соответственно; C_Δ и C_Ψ – константы, зависящие от параметров системы

$$\begin{aligned} \frac{\operatorname{tg} \Psi}{\operatorname{tg} \bar{\Psi}} e^{i(\Delta - \bar{\Delta})} &= 1 - iC_\Delta d + C_\Psi d \Rightarrow \\ \Rightarrow \begin{cases} \frac{\operatorname{tg} \Psi}{\operatorname{tg} \bar{\Psi}} \cos(\Delta - \bar{\Delta}) = 1 + C_\Psi d, \\ \frac{\operatorname{tg} \Psi}{\operatorname{tg} \bar{\Psi}} \sin(\Delta - \bar{\Delta}) = -C_\Delta d, \\ \operatorname{tg} \Psi - \operatorname{tg} \bar{\Psi} = C_\Psi d \operatorname{tg} \bar{\Psi}, \end{cases} &\Rightarrow \begin{cases} \partial \Delta = (\Delta - \bar{\Delta}) = -C_\Delta d, \\ \partial \Psi = (\Psi - \bar{\Psi}) = \frac{\sin 2\bar{\Psi} C_\Psi d}{2}. \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

Толщины окислов определены при известном времени окисления и использовании логарифмического закона окисления [7] ($d_o = d_0 \ln A(\tau + \tau_0)$) и соответствуют образованию окисла толщиной $\approx 13 \text{ \AA}$ для исследованных структур.

Решение обратной задачи эллипсометрии. В предлагаемой работе не рассматриваются проблемы решения обратной задачи эллипсометрии (ОЗЭ): выбор алгоритма вычисления, особенности выбора функционала или функции ошибок и т. д., которым было уделено внимание в [8–12].

Суть решения ОЗЭ сводится к определению параметров слоев, отличающихся степенью легирования:

1. В области слабого поглощения шести параметров одновременно: толщин верхних слоев d_1 и d_2 (см. табл. 1) и четырех параметров одного осциллятора, описывающего диэлектрическую функцию верхнего слоя:

$$\varepsilon_{\text{прозр}} = \varepsilon_\infty + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \omega_T^2}{\omega_T^2 - \omega^2 + i\Gamma_0 \omega}, \quad (4)$$

где ε_∞ и ε_s – высокочастотная и статическая диэлектрические константы соответственно; Γ_0 – фактор затухания ($\Gamma_0 > 1$); ω_T – энергия осциллятора в

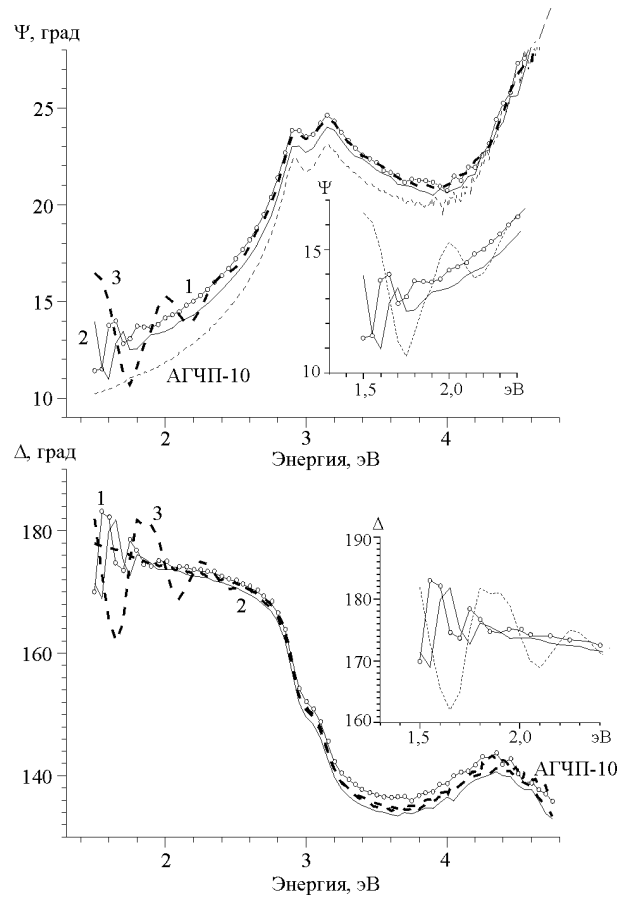


Рис. 2. Измеренные спектральные зависимости эллипсометрических углов Ψ и Δ для трех исследуемых структур с коррекцией влияния окисла толщиной ≈ 13 Å. На фрагментах показаны осцилляции Ψ и Δ в области слабого поглощения. Для сравнения приведен спектр полупроводящего GaAs

электронвольтах ($\omega \in 1,5-2,6$ эВ). Для минимизации функции ошибок χ^2 (определяемой разностью величин – измеренной и вычисленной – согласно предложенной модели (4)) использовался метод Марквардта – Левенберга:

$$\chi^2 = \frac{1}{2N} \left\{ \sum_i^N \operatorname{Re} \left[\frac{\varepsilon_{\text{изм}}(\omega_i) - \varepsilon_{\text{выч}}(\omega_i)}{a} \right]^2 + \sum_i^N \operatorname{Im} \left[\frac{\varepsilon_{\text{изм}}(\omega_i) - \varepsilon_{\text{выч}}(\omega_i)}{b} \right]^2 \right\} \quad (5)$$

(a и b – нормирующие множители).

2. В области энергий, больших 2,6 эВ, где глубина проникновения света значительно меньше толщины пленки, определяется спектральная зависимость диэлектрической функции только верхнего слоя согласно выражению (2) с учетом угла падения света φ_0 :

$$\varepsilon_{\text{погл}} = \operatorname{tg}^2 \varphi_0 \left[1 - \frac{4\rho}{(1+\rho)^2} \sin^2 \varphi_0 \right]. \quad (6)$$

Т а б л и ц а 4

Номер образца	Толщина, мкм		Суммарная толщина, мкм	± % от 0,6 мкм
	<i>i</i> -GaAs	GaAs:Si <i>n</i> -тип		
1	0,2386	0,3187	0,5573	-7,1
2	0,2896	0,3364	0,6260	+4,3
3	0,3170	0,2656	0,5826	-2,9

Как и ожидалось в обосновании работы, наблюдаются осцилляции в спектрах измеренных эллипсометрических углов Ψ и Δ для исследуемых структур 1–3 (рис. 2) в области слабого поглощения от 1,5 до 2,6 эВ, амплитуды

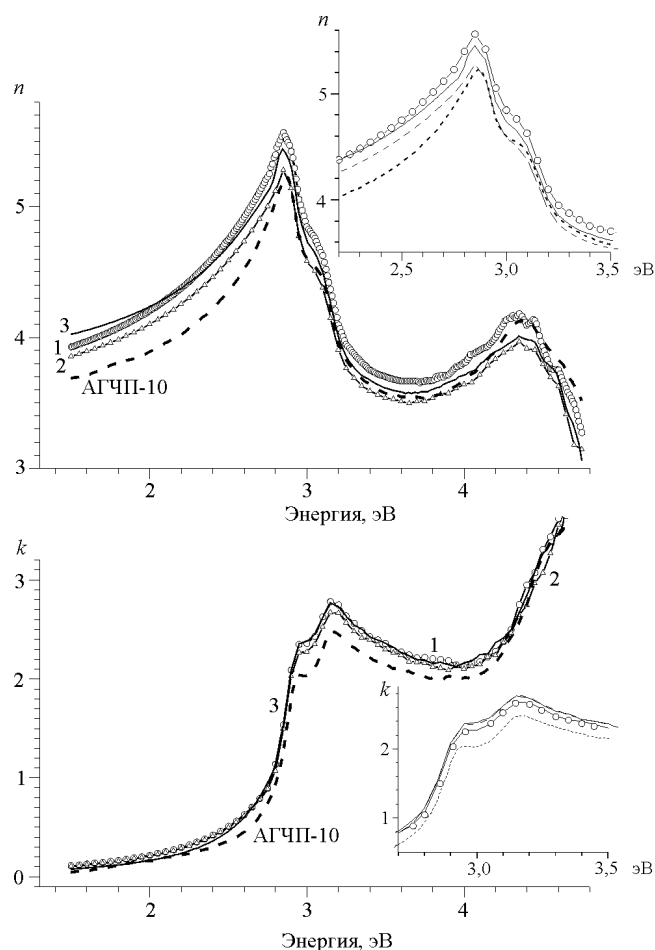


Рис. 3. Оптические свойства МЛЭ-пленок GaAs *n*-типа с концентрацией кремния $(3,0\text{--}3,5) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, найденные из эллипсометрических спектров, для верхнего слоя структуры (см. табл. 1). Для сравнения приведен спектр объемного полупроводящего GaAs. На фрагментах в увеличенном масштабе показаны те же спектры в области критических точек

да которых уменьшается по мере роста поглощения МЛЭ-пленок арсенида галлия. Несмотря на то что все исследуемые структуры выращены в одной установке и в одном режиме, осцилляции отличаются по амплитуде и по энергетическому положению экстремумов, что однозначно указывает на различие свойств по крайней мере двух верхних слоев, так как вклад света, отраженного более глубокими слоями, пренебрежимо мал. На фрагментах рис. 2 видно, что амплитуда Ψ , характеризующая модуль относительного коэффициента отражения ρ , изменяется в пределах $10-17^\circ$, а фаза Δ комплексного ρ , или разность фаз R_p и R_s коэффициентов $\delta_p - \delta_s = \Delta$, изменяется от 160 до 182° . В то же время положение первого максимума по Ψ равно $1,65, 1,70, 1,50$ эВ для 1-, 2- и 3-го образцов, а положение первого минимума по $\Delta - 1,67, 1,75, 1,65$ эВ соответственно. Таким образом, и без расчетов ясно, что спектральная эллипсометрия, обладающая высокой фазовой чувствительностью, позволяет регистрировать различие в свойствах исследуемых структур. Чтобы найти конкретные значения этих различий, необходимо решить ОЗЭ, вычисляя коэффициенты Френеля для всех слоев, показанных в табл. 1, и полагая, что известны толщины и спектральные зависимости диэлектрических функций всех слоев кроме двух верхних. Для описания неизвестной функции $\epsilon(E)$ была использована осцилляторная модель (4), в которую входят четыре неизвестных параметра. Результаты минимизации (5), а именно толщины приведены в табл. 4, а на рис. 3 в диапазоне энергий до $2,6$ эВ представлены спектральные зависимости оптических констант $n(E)$ и $k(E)$, которые показывают, что по сравнению с объемным полуизолирующим GaAs при энергии фотона $1,54$ эВ действительная часть возрастает приблизительно на $5-9\%$, а мнимая часть, т. е. поглощение, возрастает более чем на 15% , оставаясь при этом равной $\sim 0,1$. Наблюдается заметный сдвиг кривых коэффициента поглощения в сторону меньших энергий. Отклонение суммарной толщины двух верхних рабочих слоев от заданной для данных образцов колеблется от -7 до $+4\%$, и это надо учитывать при изготовлении транзисторов.

Комплексный показатель преломления для энергий, больших $2,6$ эВ, вычисленный по формулам (2) и (6), также отображен на рис. 3. В окрестности первого осциллятора (см. табл. 3) максимум n возрастает на $3-9\%$, а максимум поглощения – на $15-20\%$ по сравнению с полуизолирующим арсенидом галлия. По-видимому, в запрещенной зоне образуются дополнительные уровни, ответственные за увеличение числа переходов из валентной зоны в

зону проводимости. Создается впечатление, что в области энергий, больших $3,5$ эВ, кривые $n(E)$ пересекаются. В действительности этих пересечений нет, что хорошо видно в трехмерном пространстве параметров E, n и ik на

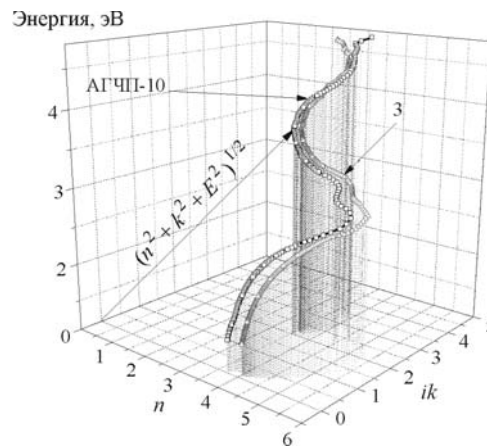


Рис. 4. Спектральные зависимости комплексных показателей преломления объемного монокристаллического GaAs и образца 3 в трехмерном пространстве с координатами E, n и ik , две проекции которых показаны на рис. 3

рис. 4, где показано движение вектора комплексного показателя преломления как функции энергии фотона, причем при больших энергиях степень легирования играет заметно меньшую роль.

Закключение. В данной работе показана возможность определения спектральной зависимости комплексного показателя преломления и толщин двух слоев арсенида галлия *n*-типа, отличающихся разной степенью легирования. Особо отметим, что в области слабого поглощения от 1,5 до 2,5 эВ можно и без расчетов оценить насколько отличаются или совпадают рабочие слои, т. е. оценить воспроизводимость структур, что очень важно при изготовлении транзисторов гигагерцового диапазона.

Автор выражает благодарность А. И. Торопову и В. В. Преображенскому за предоставленные образцы и полезное обсуждение результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бакаров А. К., Журавлев К. С., Торопов А. И. и др.** Мощные полевые СВЧ транзисторы на основе эпитаксиальных структур AlGaAs/GaAs // Микроэлектроника. 2002. **31**, № 3. С. 163.
2. **Полевые** транзисторы на арсениде галлия. Принципы работы и технология изготовления /Под ред. Д. В. Ди Лоренцо, Д. Д. Канделуола. М.: Радио и связь, 1988.
3. **Casey H. C. Jr., Sell D. D., Wecht R. W.** Concentration dependence of the absorption coefficient for *n*- and *p*-type GaAs between 1.3 and 1.6 eV // Journ. Appl. Phys. 1975. **46**, N 1. P. 25.
4. **Гавриленко В. И., Грехов А. М., Корбутяк Д. В., Литовченко В. Г.** Оптические свойства полупроводников: Справочник. Киев: Наук. думка, 1987. С. 85.
5. **Erman M., Theeten J. B., Chambon P. et al.** Optical properties and damage analysis of GaAs single crystals partly amorphized by ion implantation // Journ. Appl. Phys. 1984. **56**, N 10. P. 2664.
6. **Saxena A. N.** Changes in phase and amplitude of polarized light reflected from a film-covered surface and their relations with thickness // JOSA. 1965. **55**, N 9. P. 1061.
7. **Галицын Ю. Г., Петренко Ю. П., Свиташева С. Н.** Исследование кинетики образования и состава окисла на сколотой поверхности GaAs(110) // Поверхность. Сер. Физика, химия, механика. 1987. № 11. С. 51.
8. **Azzam R. M. A., Bashara N. M.** Ellipsometry and Polarized Light. Amsterdam: North-Holland, 1977.
9. **Свиташева С. Н.** Точное решение обратной задачи эллипсометрии для поглощающих пленок // ДАН СССР. 1991. **318**, № 5. С. 1154.
10. **Воскобойников Ю. Е., Петухова Е. В., Свиташева С. Н.** Эффективный алгоритм решения обратной задачи эллипсометрии при исследовании тонких пленок // Автометрия. 1996. № 4. С. 110.
11. **Свиташева С. Н.** Особенности решения обратной задачи эллипсометрии для сильно поглощающих пленок // Там же. С. 119.
12. **Половинкин В. Г., Свиташева С. Н.** Определение числа решений обратной задачи эллипсометрии в заданной области параметров // Автометрия. 1999. № 4. С. 94.

Поступила в редакцию 1 декабря 2006 г.